

CFRP超声加工技术研究进展

庄百亮¹ 朱卓志¹ 丁凯² 许超³ 庞昊斐¹

(1 中国机械总院集团江苏分院有限公司, 常州 213164)

(2 江苏理工学院机械工程学院, 常州 213001)

(3 清华大学深圳国际研究生院先进制造学部, 深圳 518055)

文 摘 碳纤维复合材料(CFRP)的力学性能呈各向异性且层间连接强度差,常规加工中易出现加工缺陷,严重制约其推广和使用。超声加工技术在常规机械加工的基础上叠加高频超声振动,有效降低切削力和切削温度,抑制CFRP加工缺陷产生,得到较为广泛的应用。本文基于CFRP超声加工技术研究现状,简述超声加工技术的超声振动刀柄、无线传输系统和超声电源的系统组成,从运动学特性、切削力、切屑形成机制等角度分析超声加工的材料去除及缺陷形成机理,探讨CFRP加工过程中分层、毛刺、撕裂等加工损伤成因、检测方法和超声加工的抑制作用,总结超声加工的工艺优势、应用模式及工艺参数对超声加工效果影响规律,并对超声加工技术发展趋势进行展望。

关键词 碳纤维复合材料(CFRP),超声加工,加工机理,加工工艺,研究进展

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.001

A Review of Ultrasonic Machining in Carbon Fiber Reinforced Polymers

ZHUANG Bailiang¹ ZHU Zhuozhi¹ DING Kai² XU Chao³ PANG Haoifei¹

(1 Jiangsu Branch of China Academy of Machinery Science & Technology Group Co., Ltd., Changzhou 213164)

(2 College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001)

(3 Division of Advanced Manufacturing, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055)

Abstract Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) exhibits anisotropic mechanical properties and inherently low interlaminar bonding strength, which collectively lead to machining defects during conventional processing, consequently limiting its broader industrial application. Ultrasonic machining, which superimposes high-frequency vibrations onto conventional mechanical processes, has been widely adopted due to its proven capability to reduce cutting forces/temperatures while mitigating machining defects in CFRP composites. This study provides a systematic review of ultrasonic machining technology for CFRP, beginning with an overview of key system components: ultrasonic vibration tool holders, wireless power transmission systems, and ultrasonic power supply units. The material removal mechanisms and defect formation dynamics are analyzed through multiple perspectives, including kinematic characteristics, cutting force fluctuations, and chip formation patterns. Special attention is devoted to the investigation of the root causes, detection methodologies, and ultrasonic suppression mechanisms of typical processing defects such as delamination, burr formation, and tearing. Furthermore, the review systematically summarizes the technical advantages, operational paradigms, and process parameter-effect correlation mechanisms in ultrasonic machining, while projecting future development trajectories.

Key words CFRP, Ultrasonic machining, Machining mechanism, Machining technology, Research progress

0 引言

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,

收稿日期:2024-01-10

基金项目:江苏省产业前瞻与关键技术重点研发项目(BE2022106)

第一作者简介:庄百亮,1984年出生,正高级工程师,主要从事精密制造和特种加工工作。E-mail:13585317691@163.com

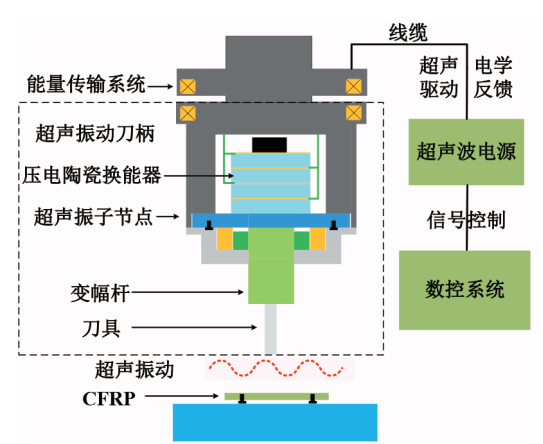
CFRP)具有比强度高、比模量大、耐磨损、耐高温、耐腐蚀等优异的机械、物理和化学性能,在航空航天、汽车制造、医疗器械等领域有广泛的应用前景。CFRP在工程应用中常需要与其他结构件进行机械连接,不可避免需要进行一定量的铣槽和钻孔加工。由于CFRP的非均质、各向异性、层间连接强度低、导热性差、纤维强度高和硬度大等特点,在加工过程中容易出现分层、撕裂和毛刺等损伤,难以满足自身尺寸精度以及与其他构件的装配精度需求^[1-2]。

为改善CFRP的可加工性,各专家学者从多角度出发,采用激光加工、磨料水射流加工及超声加工等方式,以实现CFRP的高质量加工。然而,CFRP的多相结构特点,其基体和碳纤维增强材料熔沸点不同,激光加工会在工件表面留下较严重的烧伤。水射流加工能提高CFRP的加工质量,但部分CFRP构件的加工过程必须为干切,其应用范围有一定的局限性。超声加工通过在刀具或工件上施加大于15 kHz的高频振动,形成高速旋转、进给和超声振动的复合切削方式,有切削力小、切削热低、工件表面质量高、刀具耐用度高、加工稳定性好等优点^[2-4]。因此,国内外学者从超声系统、加工机理、加工工艺等多方面大量开展CFRP超声加工技术研究,以减少加工损伤,改善表面质量。本文针对CFRP的超声加工技术研究现状及发展趋势进行综述,拟为CFRP的高质、高效加工技术的发展提供理论依据和技术参考。

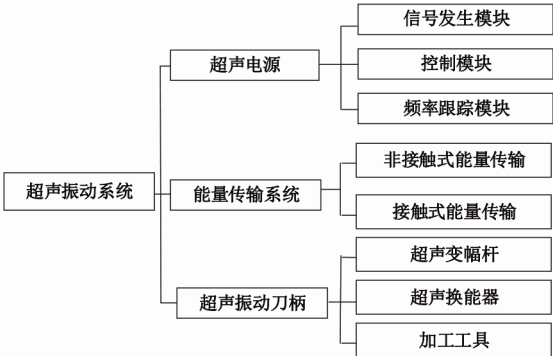
1 CFRP 超声加工系统研究

超声加工技术是在常规切削加工的基础上,对切削刀具或工件施加高频振动,以改善加工效果,可分为刀具振动和工件振动两类。但随压电陶瓷作为超声换能器技术的成熟,以外部电路驱动换能器控制刀具振动的超声加工方式更为灵活,适用于更多加工生产场景,也是本文讨论的重点。刀具振动的超声系统通常包括超声电源、超声能量传输单元和超声振动刀柄,如图1所示。超声电源主要产生高频电信号,通常包括信号发生模块、控制模块和频率追踪模块。能量传输单元用于连接超声电源和刀柄,将高频电信号传递到刀柄中。超声振动刀柄包括换能器、变幅杆和刀具等部分,可将高频电信号转化成高频机械振荡,在刀具前端产生超声振动。

变幅杆和换能器是超声振动刀柄的核心部件,直接决定了超声系统的振动频率、幅值和稳定性。GAO等^[5]通过有限元仿真分析超声振子的振动模式和性能,设计可放置在手枪钻上的超声波工作头。纵向振动超声刀柄多适用于CFRP的超声钻削和超声磨削,而对有断屑等其他工艺需求的超声工艺,则需要相对复杂的纵扭、纵弯等二维或三维的超声振动刀柄,如图2所示^[6]。HASSAN^[7]考虑声波折射和



(a) CFRP 超声加工系统主要部件



(b) 超声加工系统组成

图1 超声加工系统

Fig. 1 Ultrasonic machining system

反射原理,在幅杆上开螺旋槽,将部分纵波转换为剪切波,使纵振超声刀柄转变为纵扭振动超声刀柄。吴陈军^[8]考虑纵向振动与扭转振动的共节点问题,研究纵扭转换结构的纵向和扭转激振力和力矩的产生机理,设计出纵扭共振超声刀柄。

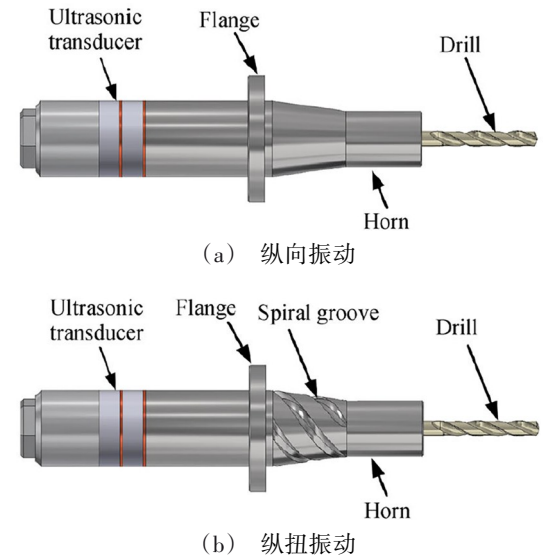
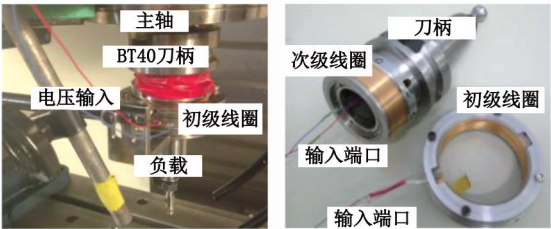


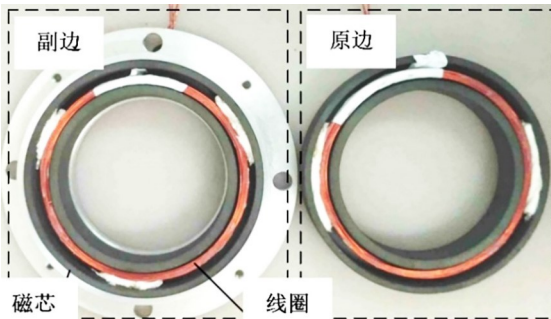
图2 超声振动刀柄^[6]

Fig. 2 Ultrasonic vibration tool holders^[6]

在能量传输方式上,相对常规通过碳刷和导电滑环相互摩擦的接触式能量传输方式,以无线电能传输方式的非接触式超声加工系统更加灵活,并将副边线圈与振动单元集成超声刀柄进行使用,如图3所示^[9]。赵斌斌等^[10]研究超声磨削无线电能传输中系统的电流变化特性,调节超声加工原边和副边的最佳距离,提高系统的稳定性。陈曦^[11]设计1/4槽型电能传输系统,减少圆槽型传输系统的线圈对数控机床上换刀动作的影响。



(a) 径向非接触式能量传输^[8]



(b) 轴向非接触式能量传输^[9]

图3 非接触式能量传输系统

Fig. 3 Non-contact energy transfer system

超声电源是超声波信号的产生模块,其高频激励信号主要有自激振荡式、模拟芯片激励式、数字集成式芯片激励式三种产生方式^[12]。自激励振荡电路常见如RC振荡、LC振荡和石英晶体振荡电路,输出频率稳定性差。模拟集成芯片将特定电路集成模拟芯片中,通过模拟芯片和外接电阻元件完成特定波形和频率信号输出。数字集成式芯片振荡常使用直接数字式频率合成技术(DDS)配合开关管等控制信号产生,系统动态响应较快,常见STM32和FPGA芯片设计的超声电源,如图4所示^[13]。

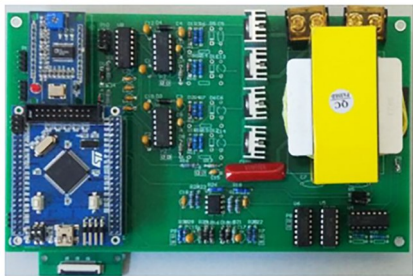


图4 超声电源电路设计^[13]

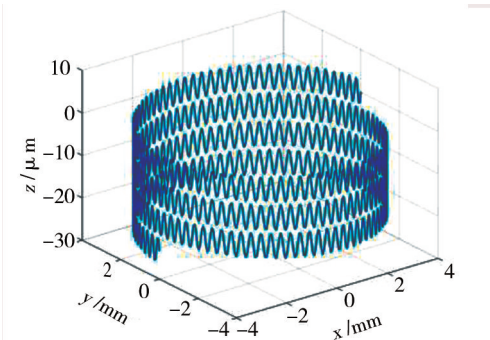
Fig. 4 Design of ultrasonic power supply circuit^[13]

韩坤^[14]为驱动纵弯超声振动刀柄,基于STM32芯片结合DDS技术设计超声电源控制模块。何祥磊等^[15]设计具有频率追踪功能超声电源,进行电源频率识别的稳定性试验,电源追踪频率与谐振频率误差率小于1%。

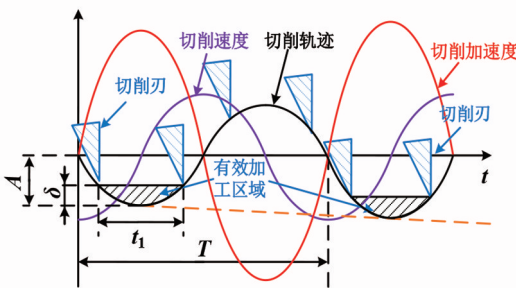
2 CFRP超声加工材料去除机理研究

2.1 超声振动对切削力影响

超声加工技术是通过刀具施加高频的振动,使得刀具具备周期性的动态冲击切削效果,改变材料的去除方式,有效降低切削力。李哲等^[3]进行CFRP的超声孔加工材料去除机理研究,认为超声加工的切削刃速度大小和方向都随切削时间做周期性变化,在切削区域局部产生变速效应、变向效应和加速度冲击效应,增强刀具切削性能,使切削力和温度分别降低了12%~20%和16%~24%,纤维粉尘粘刀现象明显减少。郑雷等^[16]认为超声加工的振动冲击作用使得切削刃在单周期内只有极短的时间参与切削,改善加工环境,促进纤维材料断裂,并使得切削力降低6%~25%,超声加工切削刃运动轨迹和切削特性如图5所示。



(a) 超声加工切削刃运动轨迹



(b) 超声加工切削刃运动特性

图5 超声加工运动学特性^[16]

Fig. 5 Kinematic characteristics of ultrasonic machining^[16]

建立CFRP的超声加工切削力模型,分析高频振动对切削力影响,有助于进一步揭示超声加工材料去除机理。XU等^[17]开展CFRP超声椭圆振动切削试验,考虑超声加工时的振动冲击作用对碳纤维材料的切断和

挤压作用,建立微观单纤维超声振动切削力模型,揭示CFRP超声切削加工时的受力变形机制。TSAO等^[18]基于断裂力学,建立可预测分层损伤的临界力轴向力模型。王晓亮等^[19]进行CFRP超声孔加工实验并采用最小二乘法拟合切削力与主轴转速和进给速度的数学关系模型。结果表明超声加工可显著降低轴向力,拟合关系模型与试验数据一致。

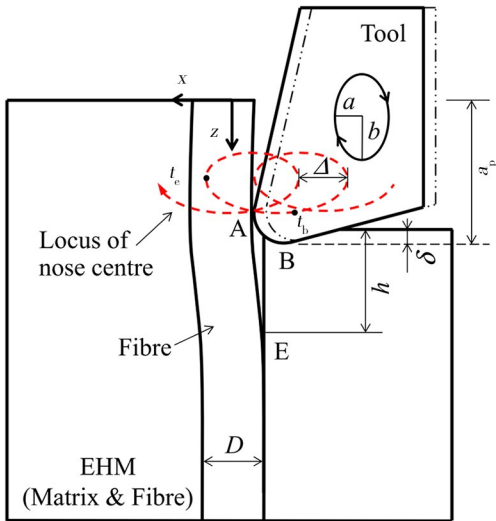


图6 超声加工单纤维受力^[17]

Fig. 6 Force analysis diagram of ultrasonic vibration cutting of an FRP composite^[17]

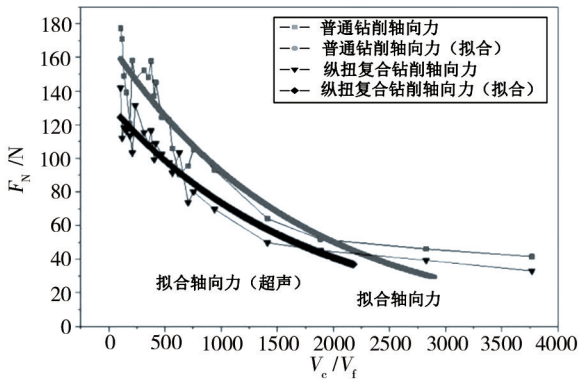


图7 超声加工拟合轴向力^[19]

Fig. 7 Fitting axial force of ultrasonic machining^[19]

2.2 CFRP 超声加工成屑机理

CFRP由高强度增强碳纤维和树脂基体制备而成,具有非均质性、各向异性和层叠特性,其成屑机理与常规金属材料相差较大。在常规切削加工中,CFRP受切削刃的挤压和剪切作用影响显著,其断裂成屑常包括基体破裂、纤维和基体脱离、纤维断裂等过程。宿友亮等^[20]考虑刀具对CFRP的切断、挤压及抬挤作用将纤维断裂成屑方式划分为开裂-弯断型、纤维切断-剪切滑移型、压曲型和弯折-剪切型、纤维压曲型和弯断型。引入超声振动后,刀具与CFRP之间形成周期性接触-分离的断续切削,材料的切屑形成机理发生改变,成屑

方式受纤维铺层角度、材料属性、切削角度和超声的振动冲击作用影响,切削加工中的断裂去除通常认为是一系列的脆性断裂过程,为简化分析过程,学者们将纤维的断裂去除形式分 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的四个典型纤维方向角进行研究,如图8所示^[21]。

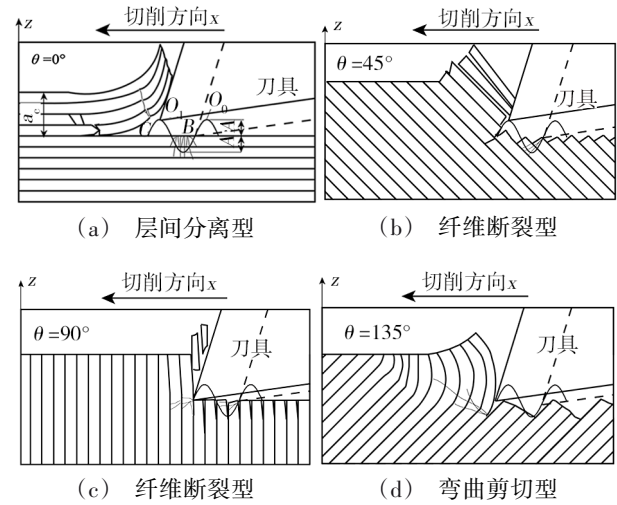


图8 不同角度下的超声加工切屑形成^[21]

Fig. 8 Chip formation in ultrasonic machining of different angles^[21]

有限元仿真技术可有效模拟CFRP的超声振动切削过程,通过分析纤维应力、应变和损伤云图,揭示纤维断裂成屑机理,极大降低试验成本。马付建等^[22]建立CFRP二维正交有限元仿真模型分析纤维成屑机理,认为在超声加工的振动冲击和切削刃对纤维的挤压的复合作用下,纤维更容易受压缩、剪切作用而断裂成屑去除。邱建平^[23]以HASHIN失效准则和PUCK失效准则建立典型铺层角度有限元模型,以能量耗散量化超声加工中纤维断裂成屑机理,指出超声加工使刀具具有脉冲动态冲击切削特性,减少纤维弯曲和挤压造成的基体破坏和界面断裂,使纤维更多以短切屑断裂去除,如图9所示。

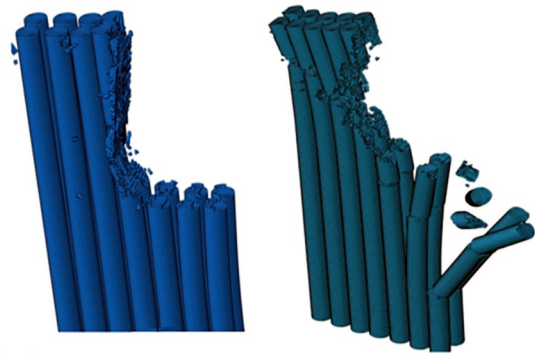


图9 纤维方向角为 90° 的超声加工仿真^[23]

Fig. 9 Simulation of ultrasonic machining with fiber direction angle of 90° ^[23]

3 CFRP 超声加工损伤抑制研究

3.1 CFRP 加工损伤成因

CFRP在加工中除普遍存在的尺寸、形状、位置等几何误差外,还存在纤维抽丝和拔出、基体开裂、毛刺、撕裂和分层等特有的加工缺陷。CFRP 分层缺陷是由层间裂纹扩展形成,基于线弹性断裂力学对CFRP加工时断裂形式进行分析,将分层损伤划分三种类型,如图 10 所示。CFRP 各相邻铺层间结合强度不足以抵抗垂直应力带来的形变时,将产生裂纹并沿层间方向不断扩展,形成张开型裂纹。纤维铺层间受切削刃的剪切应力影响,形成滑开型裂纹。刀具切削能力下降,纤维不能即时有效切断,受到轴向力和扭矩产生剪切作用力耦合作用,各纤维铺层间产生开裂,并沿着铺层方向扩展,形成撕开型裂纹。

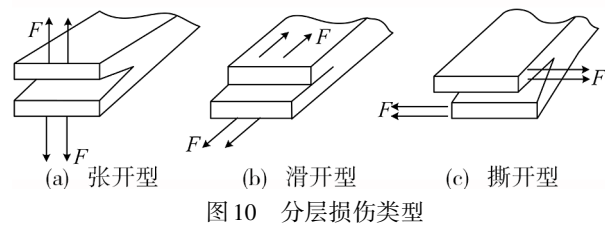


Fig. 10 Types of delamination damage

分层缺陷常表现为CFRP受层间内应力作用影响而产生的脱胶和断裂现象。CFRP切削加工中,材料的整体模量会随着材料去除量增多逐渐降低,而CFRP的多相结构使得层与层的结合作用力相对较弱,易受切削力挤压和摩擦作用产生的层间作用力产生变形。当产生的层间作用力超过树脂基体和纤维增强材料的结合强度时,各铺层间会产生裂纹并沿着层间方向扩展形成分层脱胶现象,如图 11 所示^[24]。

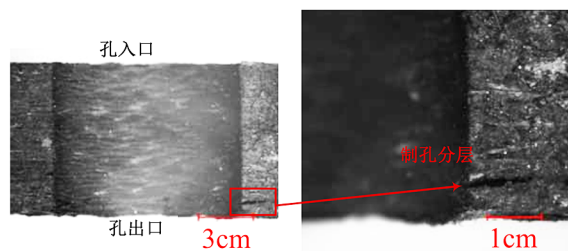


图 11 分层损伤^[24]
Fig. 11 Delamination damage^[24]

毛刺和撕裂为CFRP加工中较常见的损伤形式,分别表现为未被有效切除的纤维束黏接在工件表面、碳纤维束从树脂基体中剥离,如图 12 所示。

在CFRP的加工过程中,刀具磨损使得切削刃锋利度逐渐下降,无法有效切除纤维,使得部分纤维束残留在工件表面形成毛刺缺陷。同时,刀具与材料间的切削力会逐渐增大并大于CFRP各铺层间的结合强度,外层材料会受刀具剥离作用力影响从基体

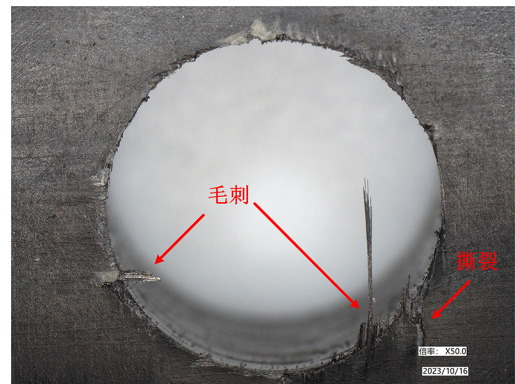


图 12 毛刺与撕裂损伤
Fig. 12 Burrs and tears damage

中脱离,在工件表面形成撕裂缺陷。HINTZE 等^[25]基于板弯曲理论对CFRP铣削槽时纤维断裂形态进行理论和试验研究,发现纤维铣槽时的断裂形态为垂直于铺层平面的弯曲断裂和平面内的弯曲断裂。

3.2 CFRP 加工损伤检测及评价方法

对CFRP加工分层缺陷评价,常采用分层因子进行定量评判。王晓雪^[26]定义孔表面产生分层损伤最大圆直径和理论加工孔径之比为分层因子以表征分层缺陷范围。然而,采用分层因子评判方法仅依靠最大损伤直径评判,误差较大,部分学者采用面积法进行二维分层缺陷评判。FARAZ 等^[27]采用损伤区域面积与制孔公称面积比值表征分层缺陷。在此基础上,魏莹莹等^[28]采用超声C扫描技术对CFRP区域逐层扫描建立三维分层损伤评价模型,以产生分层损伤区域体积与加工区域的公称体积比值表征分层缺陷范围。对于毛刺和撕裂缺陷的检测方法,通常采用显微镜观测其长度和面积进行量化评判,如图 13 所示。李桂玉等^[29]通过显微镜观测CFRP撕裂区域形貌,认为制孔时孔两侧沿纤维方向的孔直径部位易产生最大撕裂损伤,选取沿着纤维方向撕裂最大长度作为评判毛刺和撕裂缺陷的量化标准。

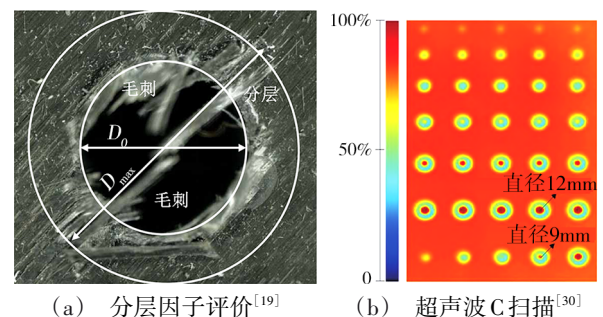


图 13 CFRP 损伤评判
Fig. 13 CFRP damage assessment methods

3.3 CFRP 超声加工的损伤抑制作用

超声加工的高频振动冲击加工使刀具切削性能提升,在降低切削力同时,也促使纤维断裂去除,抑制加

工损伤产生。邵振宇等^[31]进行CFRP超声钻削研究,结果表明,超声加工的钻削力和扭矩随进给速度降低而不断减小,较常规钻削方式,轴向力和扭矩最大降低46%和50%,减少孔出口边缘的撕裂损伤(图14)。MAKHUM等^[32]进行CFRP超声孔加工研究,发现超声加工周期性断续切削改变了工件的切屑形态,使出口分层因子降低30%~40%,极大提高了孔加工质量。较常规加工,超声加工对CFRP加工中的毛刺、撕裂、分层等损伤有明显抑制作用,有效提高工件表面质量。XU等^[33]对比不同纤维倾角CFRP的常规切削和超声切削表面质量,发现超声加工可以减少纤维因刀具挤压产生的弯曲断裂,可以有效抑制纤维表面亚损伤见图15。

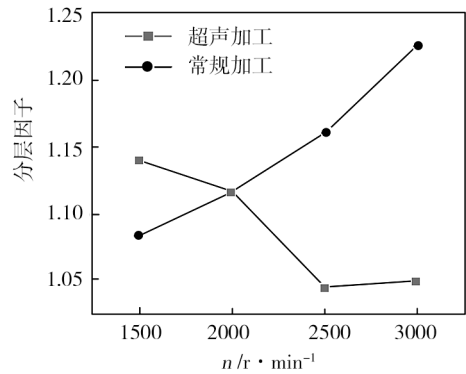


图14 超声加工与常规加工分层因子对比^[31]

Fig. 14 Comparison of delamination factor between ultrasonic drilling and conventional drilling^[31]

此外,超声加工的振动冲击效果,有助于改善切削刃切削性能,减弱CFRP加工中树脂受热软化涂覆在工件表面造成的纤维粘刀现象,减少纤维拔出,抑制毛刺产生,改善加工质量。

4 CFRP超声加工工艺研究

4.1 CFRP超声加工工艺

CFRP超声钻削工艺通过对钻头上施加超声频率振动,降低钻削过程的轴向力,抑制孔加工损伤,延长刀具寿命。HUANG等^[34]进行CFRP超声钻削试验,如图16所示。结果表明,降低主轴速度,刀具的磨损减少,相对于常规加工方式,超声加工的刀具侧面磨损最大减少达13.0%。田亮等^[35]采用刀具后刀面磨损带平均宽度作为刀具磨损评价标准进行CFRP钻削试验,相对常规加工,超声加工在加工完22个孔后刀具磨损量减小15%,孔出口处毛刺和撕裂损伤减小。

CFRP的超声“以磨代钻”通过采用固结磨料(金刚石、立方氮化硼等)空心刀具进行“磨”孔加工,将集中在原钻头横刃和主切削刃上的切削力分散到微小磨粒上,降低刀具对材料的推挤作用,抑制孔分层损伤产生,其原理和应用如17图所示^[37]。LU等^[38]分析超声套料钻磨削原理和刀具运动学特性,建立钻

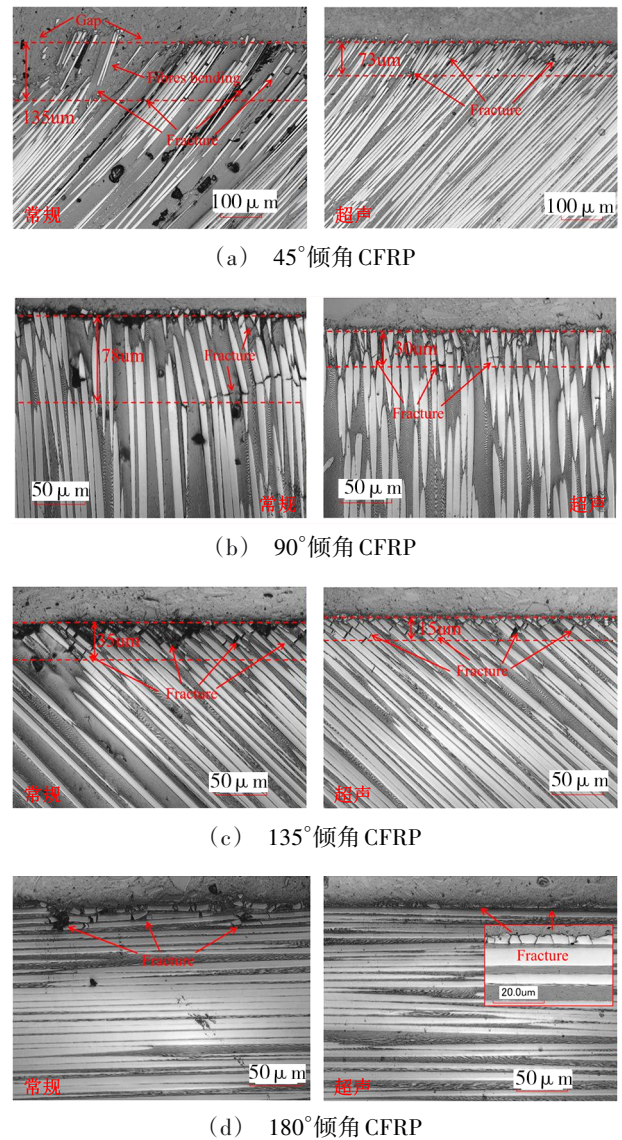


图15 常规切削和超声切削表面损伤对比^[33]

Fig. 15 Comparison of subsurface damage with conventional cutting and ultrasonic cutting^[33]

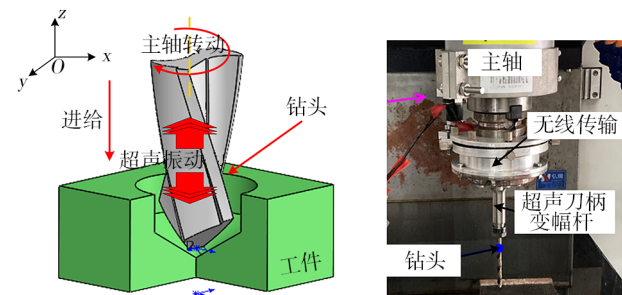


图16 超声钻削加工^[34]

Fig. 16 Ultrasonic drilling^[34]

削力数学模型,通过CFRP孔加工试验验证模型可靠性,发现超声加工可使钻削力下降22.8%~32.7%,有效减少毛刺和撕裂损伤产生。

超声螺旋铣孔加工具有钻削和铣削的复合工艺特点,通过控制刀具在高速旋转的同时作螺旋进给

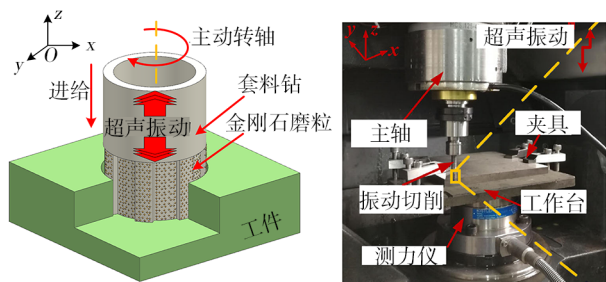


图 17 超声磨孔加工^[37]

Fig. 17 Ultrasonic grinding on hole^[37]

运动,形成径向不连续切削和周向连续切削效果,可以进一步降低切削力,减少 CFRP 加工毛刺和撕裂,提高制孔质量。CHEN 等^[39]进行 CFRP 超声螺旋铣削研究,其原理和应用如图 18 所示。相对于常规加工,超声螺旋铣轴向切削力最大降低 40%,孔壁表面纤维断口整齐,纤维拔出和撕裂损伤减少。SADEK 等^[40]分析超声螺旋铣工艺对切削力、切削温度和表面质量影响,相对常规加工,切削力减小,切削温度最大降低 60%,同时 CFRP 孔加工中分层损伤减少,孔壁加工质量有明显提高。

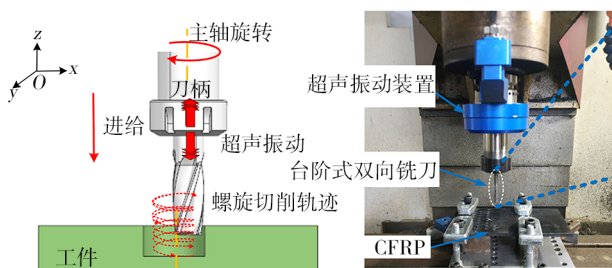


图 18 超声螺旋铣削孔加工^[39]

Fig. 18 Ultrasonic spiral milling on hole^[39]

CFRP 超声铣削加工通过在常规铣削加工过程中引入超声振动,增强铣刀切削刃的切削能力和断屑效果,促进纤维断裂去除,抑制铣削表面毛刺和撕裂损伤产生。NOR 等^[41]采用 PCD 铣刀对 CFRP 进行超声铣削研究,其原理和应用如图 19 所示。对比常规加工方式,超声加工可有效抑制刀具磨损,使切削力降低 20%,切削温度降低 15%。孙红伟等^[42]采用机器人和加工中心对 CFRP 进行铣削试验,结果表明,超声振动的引入可有效减小铣削加工的颤振和切削力波动现象,提高加工过程稳定性,同时,相对于常规加工,在机器人的超声加工中刀具磨损降低 35%,表面粗糙度 R_a 降低 23%。

4.2 工艺参数对超声加工效果影响

CFRP 超声的加工质量与加工参数密切相关,较多学者搭建超声试验平台开展 CFRP 超声工艺研究,对切削力、切削温度、表面加工质量等进行深入分析。SHI 等^[43]进行 CFRP 超声侧边铣削试验研究,结

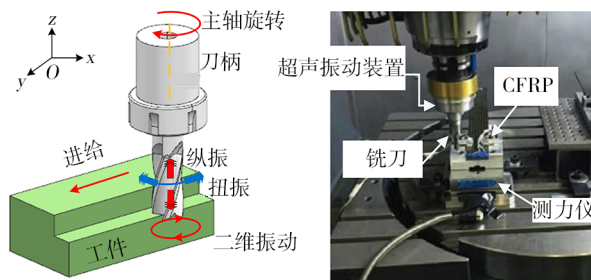
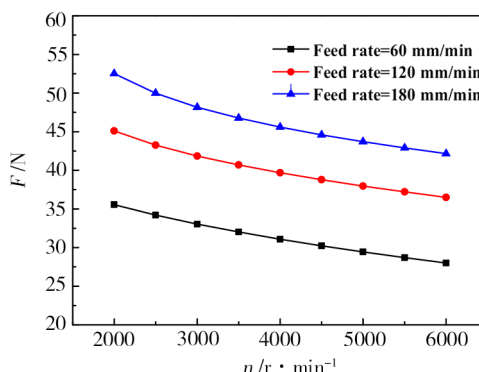


图 19 超声铣削^[41]

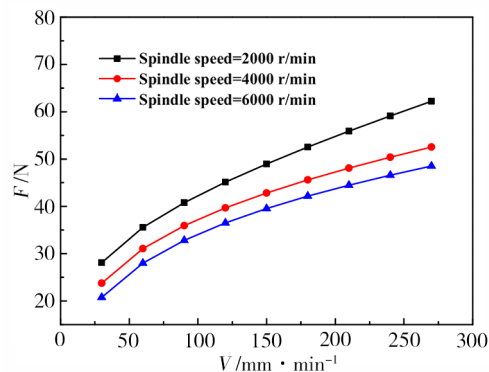
Fig. 19 Ultrasonic milling^[41]

果表明,切削力随主轴转速提升和进给速度下降呈降低趋势,如图 20 所示。吴小飞^[44]进行 CFRP 超声钻削单因素和正交试验,结果表明,钻削轴向力和温度随主轴转速提高分别呈降低和升高趋势,随进给速度增大分别呈增大和降低趋势,钻削轴向力受进给速度影响较为显著,而切削温度受主轴转速影响较为显著。高航等^[45]分析 CFRP 超声螺旋铣孔工艺参数变化对切削力、切屑形式和制孔质量影响,发现当轴向单齿切削进给量小于振幅时,加工时产生的切屑以细小短切屑为主,同时轴向切削力减小,毛刺和撕裂损伤减小,孔加工质量明显提升。

此外,频率、振幅等超声参数的变化对 CFRP 的



(a) 切削力随主轴转速变化



(b) 切削力随进给速度变化

图 20 切削力随切削参数变化规律^[43]

Fig. 20 The changing rule of cutting force with various cutting parameters^[43]

加工质量也有显著影响。纪道航等^[46]认为振幅与转速、切深、进给参数的交互作用会显著影响 CFRP 的表面质量,通过降低进给速度、提高主轴转速、合理提高振幅等方式对切削参数优化可使得表面损伤降低 10% 以上,各参数交互作用的影响规律如图 21 所示。康仁科等^[47]通过对 CFRP 加工损伤的影响因素进行分析,认为切削力与主轴转速关联性小,而降低进给速度和增大振幅,可使 CFRP 切削力降低和表面撕裂损伤显著减小。NING 等^[48]建立 CFRP 超声加工

的切削力与工艺参数关系模型,认为切削力随进给速度降低和振幅增大呈减小趋势。孙建立等^[50]分析不同刀具悬长对超声振幅和加工效果影响,发现刀具振幅随悬长增大而增大,而过大的振幅增大了刀具的横向摆动,降低 CFRP 的孔径精度。除了工艺参数的选择外,刀具的材质、几何结构、加工路径等因素同样对加工质量产生显著影响,学者们对不同振动形式、不同加工方式下超声参数对 CFRP 加工效果进行深入研究,表 1 为部分学者研究结果总结。

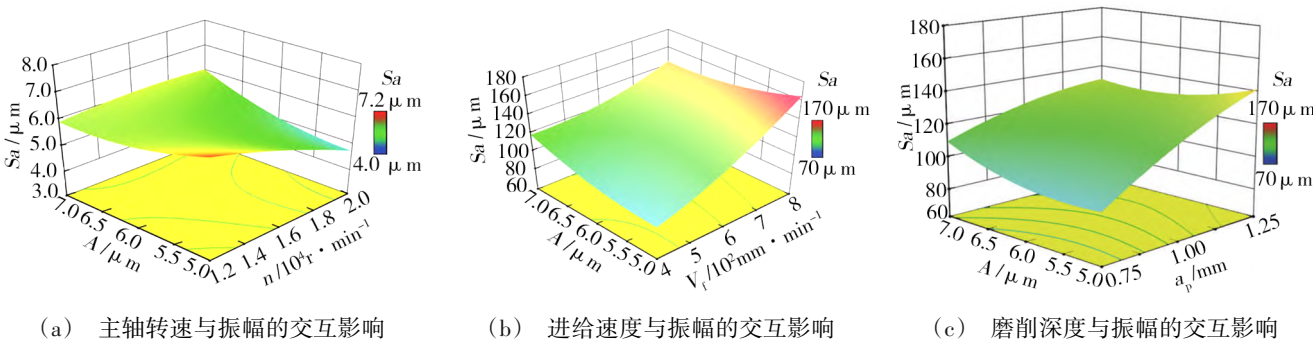


图 21 工艺参数交互作用对加工损伤影响^[46]

Fig. 21 The influence of process parameter interaction on surface damage^[46]

表 1 超声参数对 CFRP 加工效果影响

Tab. 1 The influence of ultrasonic parameters on the processing effect of CFRP

振动形式	超声参数	加工方式	刀具	结论
轴向	频率: 18.6 kHz, 振幅: 10 μm	钻削	麻花钻	切削力降低 41.6%~46.32%, 扭矩降低 41.61%~48.94% ^[47]
轴向	频率: 21.5 kHz, 振幅: 7.5 μm	套磨	套料钻	切削温度降低 16%~24%, 表面粗糙度 Ra 降低 33%~39% ^[3]
椭圆	频率: 35 kHz, 纵扭比为 1:1, 振幅: 8 μm	钻削	麻花钻	轴向力和扭矩降低, 制孔撕裂因子降低, 加工损伤减小 ^[19]
轴向	频率: 39 kHz, 振幅: 5 μm	铣削	铣刀	切削力降低 10% ^[41]
轴向	频率: 18.6 kHz, 振幅: 10 μm	螺旋铣	铣刀	铣削力降低 9.0%~35.7%, 毛刺和撕裂损伤得到抑制 ^[39]
椭圆	频率: 32 kHz, 纵扭比为 1:1, 振幅: 11 μm	螺旋铣	铣刀	铣削力降低 71.5%, 表面粗糙度 Ra 降低 51.9%~53.2% ^[49]

5 结语

(1)CFRP 的超声加工技术仍在高速发展,超声振动系统仍在逐渐完备。现阶段的超声振动形式多聚焦于轴向纵振和纵扭振动两种,并通过无线能量传输系统搭载在高转速的主轴上,以适用各种复杂工况加工需求,对于超声电源的信号输出稳定性也不断提出更高要求。

(2)超声加工可以增强刀具切削能力,改善加工环境,促进碳纤维断裂去除,减少加工损伤。超声加工的高频振动冲击作用,改变了刀具运动轨迹,形成变速效应、变向效应和加速度冲击效应,强化刀具切削刃的切削和断屑能力,促使纤维更多以短切屑形式断裂去除,提高加工质量。

(3)相比常规加工,超声加工可有效降低切削力、切削温度、延长刀具寿命,有效促使纤维断裂去

除,减少纤维毛刺以及纤维从工件表面剥离形成的撕裂损伤,抑制 CFRP 加工分层损伤产生,在较高主轴转速和较低进给速度时,获得更好的加工效果。

近年来,随 CFRP 的应用范围不断扩展,各类极端应用领域对 CFRP 的耐温性、硬度、强度等性能指标的要求不断提高,增加了碳纤维复合材料的加工难度,对 CFRP 超声加工技术提出更高要求。

(1)超声加工的基础理论需进一步加强。CFRP 的自身属性、加工刀具、超声振动形式、加工工艺不同,材料的去除机理也有较大区别。对于超声加工的断裂去除机理,不局限于考虑刀具切削轨迹变化对材料挤压和剪切作用影响,还应考虑超声空化、弹射作用以及纤维材料自身的断裂特性,建立较为全面的纤维材料去除和成屑理论。

(2)超声加工工艺缺乏系统性分析。随碳纤维

制造技术的快速发展,各型号CFRP的属性和结构差异较大,超声振动形式也不同。现有的CFRP超声加工工艺研究多局限于单一材料,所得出的结论没有普适作用,因此需要建立CFRP相关工艺数据库,针对各类CFRP延伸材料优化超声刀柄的结构和工艺选择,满足高质、高效和高稳定性CFRP加工需求。

(3)超声加工系统的开发需要深化,相关的行业技术规范 and 标准需要制定。现阶段,超声加工系统多以附加模块的方式安装在机床中,由于缺乏相关技术规范 and 标准,超声振动刀柄多根据机床主轴进行单独设计,一定程度制约超声系统生产的标准化和批量化,亟需一个CFRP超声加工行业内共识的规范和标准。此外,超声模块的引入对于机床工作的稳定性需要长时间验证,对于超声加工技术的研究仍需进一步深化。

参考文献

[1] VOß R, HENERICH S M, RUPP S, et al. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016, 12(1): 56-66.

[2] ASMAEL M, SAFAEI B, ZEESHAN Q, et al. Ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: a review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3): 3079-3120.

[3] 李哲,王新,张毅,等. CFRP超声振动套磨钻孔高效排屑机理和实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 229-240.

LI Z, WANG X, ZHANG Y, et al. Mechanism and experiment on high-efficiency chip removal in ultrasonic vibration coredrilling of CFRP [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 46(1): 229-240.

[4] 束静,廖文和,郑侃,等. 旋转超声加工碳纤维复合材料研究现状与展望[J]. 航空学报, 2024, 45: 1-24.

SHU J, LIAO W H, ZHENG K, et al. Review on rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45: 1-24.

[5] GAO Y F, YANG X, XIAO J H, et al. The development of an ultrasonic vibration hand-held pneumatic drill for hole-machining on CFRP composite materials [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(3): 1635-1652.

[6] MA G F, KANG R K, DONG Z G, et al. Hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration assisted drilling of carbon fiber reinforced plastics [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2020, 15: 538-546.

[7] AL-BUDAIRI H D. Design and analysis of ultrasonic horns operating in longitudinal and torsional vibration [D]. University of Glasgow, 2012.

[8] 吴陈军. 纵扭共振超声铣削系统研制及其加工实验
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

WU C J. Design and experimental study of longitudinal-torsional vibration assisted milling system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[9] 陈欢欢. 旋转超声加工刀柄研制及岩板钻孔工艺试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.

CHEN H H. Development of rotary ultrasonic machining toolholder and experimental study of rock slab drilling process [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.

[10] 赵斌斌,赵波,范凯洋. 超声振动磨削无线电能传输系统特性分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(5): 81-83, 105.

ZHAO B B, ZHAO B, FAN K Y. Characteristic analysis of ultrasonic vibration grinding radio electric energy transmission system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(5): 81-83, 105.

[11] 陈曦. 旋转超声无线电能传输系统研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.

CHEN X. Research on rotary ultrasonic wireless power transmission system [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.

[12] 安纯尧,张选峰,苏含玉,等. 基于FPGA-DDS步进追频技术的超声电源设计[J]. 电力电子技术, 2022, 56(3): 9-11.

AN C Y, ZHANG X F, SU H Y, et al. Ultrasonic power supply design based on fpga-dds stepping frequency tracking technology [J]. Power Electronics, 2022, 56(3): 9-11.

[13] 郑伟帅. 基于STM32的频率自动跟踪与振幅恒定的超声电源的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

ZHENG S W. Research and development of ultrasonic power supply with frequency auto-tracing and constant amplitude control based on STM32 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[14] 韩坤. Nomex蜂窝芯纵弯复合振动超声插切刀具及其超声电源的研制与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

HAN K. The development and application of ultrasonic slotting longitudinal and bending vibration tool for nomex honeycomb and ultrasonic power supply [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[15] 何祥磊,苏宏华,陈玉荣,等. 超声振动辅助磨削电源谐振频率自动识别研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 180-183.

HE X L, SU H H, CHEN Y R, et al. Research on automatic identification of resonant frequency of ultrasonic vibration assisted grinding power supply [J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(1): 180-183.

[16] 郑雷,孙晓晗,吕冬明,等. CFRP旋转超声振动套孔加工仿真及工艺研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(23): 391-400.

ZHENG L, SUN X H, LV D M, et al. Simulation and process study on the rotary ultrasonic vibration trepanning

drilling of GFRP [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(23): 391-400.

[17] XU W X, ZHANG L C. On the mechanics and material removal mechanisms of vibration-assisted cutting of unidirectional fibre-reinforced polymer composites [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 80(5): 1-10.

[18] TSAO C C, HOCHENG H. Analysis of delamination in drilling composite materials by core-saw drill [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2008, 32(2/3): 188-201.

[19] 王晓亮, 焦锋, 戚嘉亮, 等. 碳纤维增强复合材料纵扭复合超声振动钻削试验[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(4): 121-125.

WANG X L, JIAO F, QI J L, et al. Experimental study on longitudinal-torsional composite ultrasound vibration drilling of carbon fiber reinforced composites [J]. Machine Design& Research, 2019, 35(4): 121-125.

[20] 宿友亮, 孟志坚, 郜雪楠, 等. CFRP切削加工中刀具磨损研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 27-48.

SU Y L, MENG Z J, GAO X N, et al. Research progress of tool wear in cutting of CFRP[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 27-48.

[21] 郜广磊. 碳纤维复合材料超声辅助钻削分层损伤研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

GAO G L. Study on delamination damage of fiber-reinforced plastics by ultrasonic-assisted drilling [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[22] 马付建, 仝博超, 刘宇, 等. 纤维角度对CFRP材料超声磨削性能的影响分析[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(3): 22-27.

MA F J, QI B C, LIU Y, et al. Influence analysis of fiber angle on ultrasonic grinding performance for CFRP [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(3): 22-27.

[23] 邱建平, 陈金祥, 郝浩杰. 复合材料超声振动低损伤制孔技术研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(3): 484-492.

QIU J P, CHEN J X, HAO H J. Study on technology of ultrasonic vibration drilling of CFRP with low damage [J]. Mechanical Science& Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(3): 484-492.

[24] 罗豪. 碳纤维复合材料旋转超声制孔工艺研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

LUO H. Study on drilling process of carbon fiber reinforced plastics in rotary ultrasonic machining [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

[25] HINTZE W, HARTMANN D. Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP [J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 444-449.

[26] 王晓雪. 碳纤维复合材料超声纵扭振动辅助钻削技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

WANG X X. Research on ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted drilling of carbon fiber reinforced plastic [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[27] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(15): 1185-1196.

[28] 魏莹莹, 安庆龙, 蔡晓江, 等. 碳纤维复合材料超声扫描分层检测及评价方法[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3512-3519.

WEI Y Y, AN Q L, CAI X J, et al. CFRP ultrasonic scan delamination detection and evaluation method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3512-3519.

[29] 李桂玉, 汪海晋, 孙杰, 等. 基于复合材料钻削缺陷容差值的工艺参数优化[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 1022-1029.

LI G Y, WANG H J, SUN J, et al. Process parameter optimization based on the defects tolerance of drilling composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(4): 1022-1029.

[30] 方周倩, 苗沛源, 金肖克, 等. 碳纤维复合材料孔洞损伤超声波C扫描无损检测[J]. 纺织学报, 2022, 43(10): 71-76.

FANG Z Q, MIAO P Y, JIN X K, et al. Nondestructive testing on damage of carbon fiber composites using ultrasonic C-scanning [J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(10): 71-76.

[31] 邵振宇, 姜兴刚, 张德远, 等. CFRP旋转超声辅助钻削的缺陷抑制机理及实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1613-1621.

SHAO Z Y, JIANG X G, ZHANG D Y, et al. Defect suppression mechanism and experimental study on rotary ultrasonic-assisted drilling of CFRP [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1613-1621.

[32] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(23): 5939-5952.

[33] XU W X, ZHANG L C. A new approach to characterising the surface integrity of fibre-reinforced polymer composites during cutting [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 103: 272-282.

[34] HUANG W J, CAO S Y, LI H N, et al. Tool wear in ultrasonic vibration-assisted drilling of CFRP: a comparison with conventional drilling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(5): 1809-1820.

[35] MA G F, KANG R K, DONG Z G, et al. Hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic vibration assisted drilling of carbon fiber reinforced plastics [J]. Frontiers of

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

Mechanical Engineering, 2020, 15: 538–546.

[36] 田亮. 超声辅助钻削 CFRP 材料中的刀具磨损研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

TIAN L. Study on tool wear in ultrasonic assisted drilling of CFRP materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[37] LIANG Y H, CHEN Y, ZHU Y J, et al. Investigations on tool clogging and surface integrity in ultrasonic vibration-assisted slot grinding of unidirectional CFRP [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 1557–1570.

[38] LU Y L, YUAN S M, CHEN Y X. A cutting force model based on kinematic analysis in longitudinal and torsional ultrasonic vibration drilling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 631–643.

[39] CHEN T, LU Y J, WANG Y S, et al. Comparative study on cutting performance of conventional and ultrasonic-assisted bi-directional helical milling of CFRP [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(11/12): 3701–3711.

[40] SADEK A, MESHREKI M, ATTIA M H. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates [J]. CIRP annals, 2012, 61(1): 123–126.

[41] NOR F, HELEN A, STUART B. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) [J]. Procedia Engineering, 2017, 184: 185–191.

[42] 孙红伟, 祝景萍, 郑侃, 等. 机床与机器人旋转超声铣边对比试验研究 [J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(1): 1–6.

SUN H W, ZHU J P, ZHENG K, et al. Comparative experimental research on rotary ultrasonic edge trimming of machine tool and robot [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(1): 1–6.

[43] SHI H Y, YUAN S M, ZHANG C, et al. A cutting force prediction model for rotary ultrasonic side grinding of CFRP composites considering coexistence of brittleness and ductility [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, 2020, 106: 2403–2414.

[44] 吴小飞. 碳纤维增强复合材料的超声振动辅助钻削实验研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2022.

WU X F. Experimental study on ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.

[45] 高航, 孙超, 王焱. 复合材料超声辅助螺旋铣削试验研究 [J]. 航空制造技术, 2016(3): 16–20.

GAO H, SUN C, WANG Y. Ultrasonic assisted helical milling experiment study on composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(3): 16–20.

[46] 纪道航, 陈燕, 郭南, 等. 基于响应曲面法的 CFRP 超声振动辅助磨削工艺参数优化 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2024, 42(5): 585–594.

JI D H, CHEN Y, GUO N, et al. Optimizing process parameters of ultrasonic vibration assisted grinding CFRP based on response surface method [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2024, 42(5): 585–594.

[47] 康仁科, 陆冰伟, 陈凯良, 等. 超声振动辅助磨削 CFRP 复合材料薄管撕裂损伤研究 [J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 524–533, 540.

KANG R K, LU B W, CHEN K L, et al. Study on tearing of CFRP thin circular tubes machined by ultrasonic vibration assisted grinding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 35(3): 524–533, 540.

[48] NING F D, WANG H, CONG W L, et al. A mechanistic ultrasonic vibration amplitude model during rotary ultrasonic machining of CFRP composites [J]. Ultrasonics, 2017, 76: 44–51.

[49] GENG D X, TENG Y D, LIU Y H, et al. Experimental study on drilling load and hole quality during rotary ultrasonic helical machining of small-diameter CFRP holes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 195–205.

[50] 孙建立, 乔国华, 吴禹锡, 等. 碳纤维复合材料板材超声振动辅助钻削工艺参数研究 [J]. 纤维复合材料, 2021, 38(4): 42–46.

SUN J L, QIAO G H, WU Y X, et al. Research on technological parameters in ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP plate [J]. Fiber Composites, 2021, 38(4): 42–46.